

Estudo petrográfico e metalográfico dos meteoritos Bocaiúva e João Pinheiro aliado à técnica de MEV/EDS

Metallographic and petrographic study of meteorites Bocaiúva and João Pinheiro combined with SEM/EDS microscopy

Flavia Noelia Pucheta

Mestranda - Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais, Departamento de Geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto
flavianoeliap@gmail.com

Maria Elizabeth Zucolotto

Astrônoma, Professora Adjunta, Museu Nacional da Universidade Federal do Rio de Janeiro, Departamento de Geologia e Paleontologia
mezucolotto@globo.com

Vitória Régia Péres da Rocha Oliveira Marciano

Diretora do Museu de Mineralogia Djalma Guimarães
museum@pbh.gov.br

César Mendonça Ferreira

Especialista em Gemologia, Departamento de Geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto
cesar.mendonca@uol.com.br

Flávio Sandro Lays Cassino

Professor Associado II, Departamento de Metalurgia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto
fscassino@yahoo.com.br

Antônio Luciano Gandini

Professor Associado II, Departamento de Geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto
gandini@degeo.ufop.br

Resumo

O Brasil possui 58 meteoritos catalogados pela ciência meteorítica, número bastante inferior quando se compara tal número àqueles de países da Europa e aos de países como os Estados Unidos. As amostras estudadas pertencem à coleção de meteoritos do Museu de Mineralogia Professor Djalma Guimarães - MMPDG, constituída de 17 meteoritos, 10 brasileiros, entre eles o Bocaiúva e o João Pinheiro. O meteorito Bocaiúva, encontrado em MG, é o terceiro maior em peso do Estado (64kg), foi achado por volta de 1947, na cidade homônima, a 384km de Belo Horizonte. Além da massa principal do meteorito Bocaiúva, também há, no referido museu outro fragmento catalogado como “meteorito Bocaiúva”, que, na verdade, é um fragmento pertencente a outro corpo meteorítico, o João Pinheiro, ainda não catalogado. A diferença mineralógica observada em ambos, principalmente com relação às porções silicáticas do Bocaiúva, assim como inclusões fluidas e fundidas, não deixa dúvida de se tratar de meteoritos diferentes. Minerais como kamacita, taenita, troilita, schreibersita e grafita são encontrados no meteorito João Pinheiro, enquanto que, no Bocaiúva, estão presentes a forsterita, kamacita, taenita, troilita, schreibersita, pentlandita, magnetita, cromita, pigeonita, diopsídio, enstatita, plagioclásios, apatita, calcita e goethita.

Palavras-chave: Meteorito, Bocaiúva, João Pinheiro, MEV/EDS, inclusões fluidas.

Abstract

Brazil has 58 cataloged meteorites for scientific studies; a low number compared to countries in Europe and the United States. The samples studied belong to a collection of 17 meteorites from the Mineralogy Museum Professor Djalma Guimarães – MMPDG in Belo Horizonte, Minas Gerais. Ten of those meteorites were found in Brazil; among them are the Bocaiúva and João Pinheiro meteorites. The Bocaiúva meteorite, the third heaviest (64kg), was found around 1947 in the town of Bocaiúva, located 384km from Belo Horizonte, in the state of Minas Gerais. Besides the Bocaiúva meteorite, there is also, in the MMPDG, another fragment cataloged as “Bocaiúva meteorite”, which is actually a fragment from a different meteoritic body, called João Pinheiro, yet to be cataloged. The mineralogical differences, especially regarding the silicate portions of the Bocaiúva, as well as fluid and melted inclusions, leave no doubt that they belong to different meteorites. Minerals such as kamacite, taenite, troilite, schreibersite and graphite are found in the João Pinheiro meteorite, while in Bocaiúva are present forsterite, kamacite,

taenita, troilite, schreibersite, pentlandita, magnetite, chromite, pigeonite, diopside, enstatite, plagioclase, apatite, calcite and goethite.

Keywords: Ceramic fragments, Dark Earth, Quebrada Tacana

1. Introdução

Os meteoritos são considerados rochas raras por sua importância científica. Porém a coleta é difícil, principalmente no caso dos meteoritos com queda no Brasil, já que o clima e a vegetação os intemperizam, confundindo-os com rochas terrestres. Portanto o corte de um corpo meteorítico em diversos fragmentos é muito comum entre museus, os quais trocam fragmentos de diferentes meteoritos entre si, para, assim, ampliar suas coleções.

Devido ao fato de que os meteoritos metálicos possuem uma elevada densidade e crosta de fusão muito similar, fragmentos de meteoritos diferentes podem ser confundidos como se fossem provenientes do mesmo corpo parental. Assim ocorreu com um fragmento doado como proveniente do meteorito Bocaiúva em exposição no Museu de Mineralogia Professor Djalma Guimarães - MMPDG, situado em Belo Horizonte. Hoje o

acervo, totalizando 17 meteoritos, entre eles 10 brasileiros, encontra-se no Museu Minas e Metal, localizado também na capital mineira.

Após estudo mineralógico e levantamento histórico do fragmento catalogado como “Bocaiúva” e de uma fatia obtida da massa principal do meteorito Bocaiúva, também em exposição no MMPDG, observou-se que o fragmento tratava-se de outro meteorito que a partir da recuperação de sua história foi identificado como João Pinheiro, município mineiro que fica a 408km de Belo Horizonte. Não existem relatos e muito menos estudos científicos com relação a esse meteorito. O fragmento pertencia à coleção de meteoritos do Instituto de Tecnologia Industrial – ITI (MG) até a década de 70 do século passado, porém jamais foi oficialmente catalogado como meteorito.

O meteorito Bocaiúva foi encon-

trado por um fazendeiro na localidade de Piedade, distrito de Diamantina (Desnoyers et al., 1985) e levado para a fazenda Terra Branca, a 6km da margem do rio Jequitinhonha, também próximo a Diamantina, entretanto no município de Bocaiúva. Em 1947, um grupo de geólogos do Instituto de Pesquisas Radioativas (IPR) da UFMG se dirigiram ao município de Bocaiúva para assistirem, junto com pesquisadores norte-americanos, a um eclipse total do sol. Nesse episódio, encontraram o meteorito escorando a porta da residência do fazendeiro. O estudo científico da peça só teve destaque em 1962, data que consta na catalogação oficial do meteorito. Apesar do Bocaiúva ter sido estudado e catalogado oficialmente, análises microscópicas em lâmina delgada, assim como a observação de inclusões fluidas e fundidas das regiões silicatadas, ainda não tinham sido realizadas.

2. Materiais e métodos

As amostras foram cortadas com o auxílio de serra de disco diamantado e seguiram o preparo metalográfico convencional: desbaste com lixas de granulometria de 240 a 1.200, polimento com alumina de 1µm e pasta de diamante com granulometrias variadas até 0,25µm. Em seguida, os fragmentos foram atacados

com nital 2%. O microscópio utilizado foi o Leitz, modelo Laborlux 12 POL S, que funciona em luz refletida e transmitida simultaneamente.

O estudo químico semiquantitativo das fases mineralógicas dos meteoritos Bocaiúva e João Pinheiro foi realizado no Laboratório de Microscopia Eletrônica

(Microlab) do DEGEO/EM/UFOP. O MEV utilizado foi o do modelo JEOL JSM-5510, associado a um espectrômetro de energia dispersiva (EDS), que opera sob potencial de 20kV, razão do tamanho do feixe de 26 a 30 e distância focal de 20 a 25mm. Apenas o meteorito Bocaiúva foi metalizado com carbono.

3. Resultados

Em amostra de mão, ambos os meteoritos possuem elevada densidade ($\approx 7\text{g/cm}^3$), aspecto metálico, crosta de fusão (Figura 1) e são atraídos por um ímã, características essas observáveis em meteoritos do tipo sideritos (metálicos).

Macroscopicamente, no meteorito João Pinheiro, podem ser observados campos plessíticos (intercrescimento de lamelas de kamacita e taenita), que chegam até 8cm de comprimento, após o ataque químico com nital, agregados de

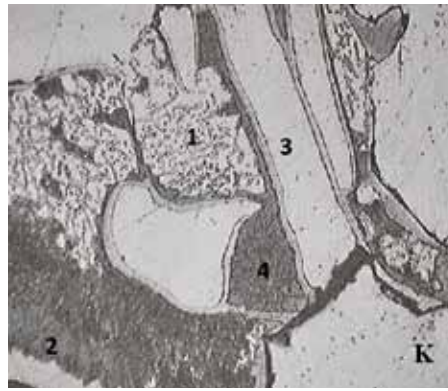
grafita de até 4,5 x 2,0mm e um nódulo de troilite medindo 1,0 x 0,7cm.

A matriz metálica do João Pinheiro corresponde à kamacita α -(FeNi). Lamelas de taenita γ -(FeNi) totalmente decompostas, com morfologia esferoidal



Figure 1
Fragmento dos meteoritos estudados:
a) João Pinheiro;
b) Bocaiúva.

Figure 2
Fotomicrografia, em luz refletida, exibindo campo plessítico inserido em matriz de kamacita (K) do meteorito João Pinheiro.
1: taenita esferoidal;
2: taenita decomposta em campo martensítico;
3: lamelas de kamacita intercalada com finas lamelas de taenita;
4: campo martensítico (escala = 20µm).



(5 a 10µm) e, às vezes, acicular, podem ser observadas numa matriz de kamacita policristalina. Lamelas de kamacita intercaladas com finas lamelas de taenita, formando o padrão de Widmanstätten, e bandas de taenita decompostas em campos martensíticos podem ser observadas apenas em campos plessíticos (Figura 2). A região do nódulo de troilita possui fraturas irregulares. Campos plessíticos

de diversas morfologias e outros com deformações resultantes de eventos posteriores à sua formação foram também observados. A borda de taenita na plessita varia para cada campo observado. A maioria das plessitas encontradas no meteorito João Pinheiro são do tipo Duplex (Figura 3). A schreibersita [(FeNi)₃P] encontra-se adjacente a campos plessíticos e isolada na matriz de kamacita com

diversas morfologias e, em alguns casos, fraturada. Bandas de Newman também foram observadas. A grafita se encontra em determinadas regiões isoladas na matriz de kamacita (Figura 4) e, em outras, associada ao mineral schreibersita.

Nas imagens obtidas do meteorito João Pinheiro no MEV/EDS, observaram-se a diferença de relevo e a composição dos minerais, principalmen-

Figure 3
Fotomicrografia, em luz refletida do meteorito João Pinheiro, exibindo plessita duplex com borda de taenita (T) bem desenvolvida, em contato com schreibersita (S) (escala = 100µm).

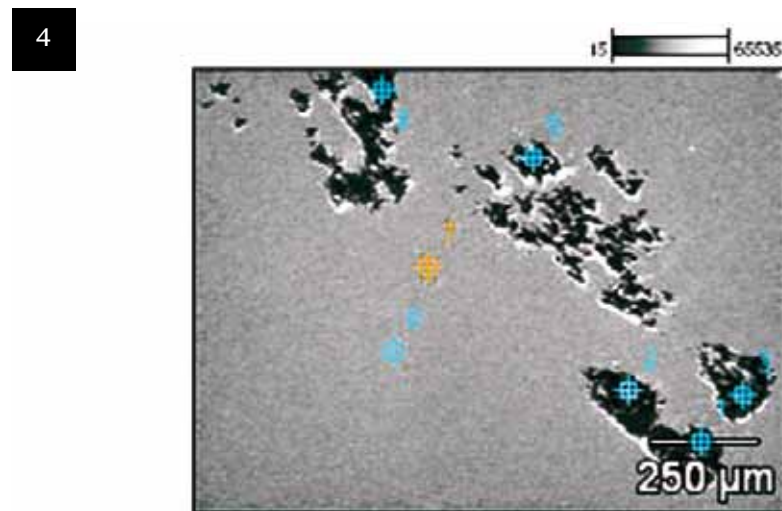
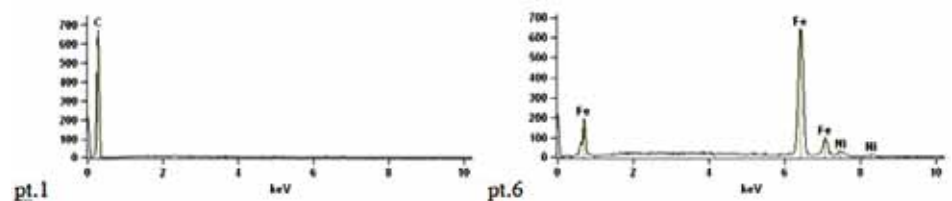


Figure 4
Espectros de fases mineralógicas do meteorito João Pinheiro, obtidos por MEV/EDS.
Pt. 1, 2, 3, 4 e 5: grafita;
pt. 6 e 7: kamacita.



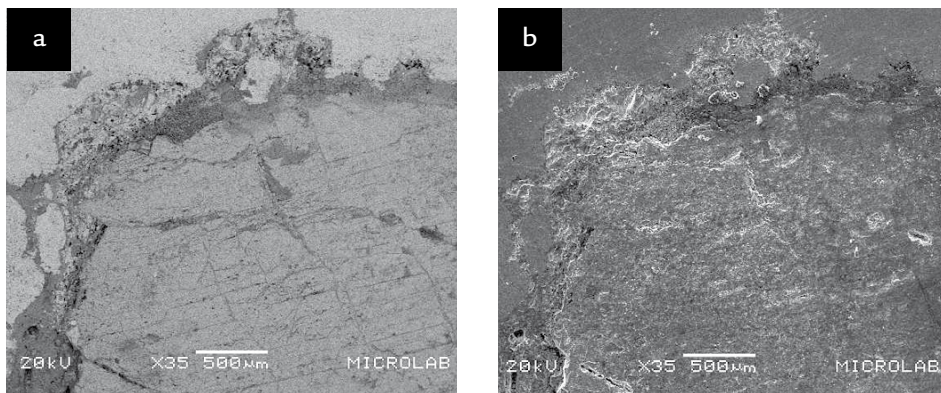


Figure 5

a) imagem de elétrons retroespalhados obtida por MEV/EDS do meteorito João Pinheiro, observam-se os diferentes tons de cinzas entre o nódulo de troilita e a matriz de kamacita devido à diferença composicional; b) mesma imagem porém de elétrons secundários obtida por MEV/EDS, observa-se a “rugosidade” de relevo na troilita.

te daqueles relacionados ao nódulo de troilita e à matriz de kamacita (Figura 5). Elementos químicos correspondentes aos minerais kamacita, taenita, troilita (FeS), grafita e schreibersita foram detectados. A ausência de silício nos espectros analisados indica a ausência de silicatos no meteorito.

O meteorito Bocaiúva apresenta padrão de Widmanstätten com dimensões de lamelas de kamacita que variam de 0,3 a 0,5mm. Os silicatos, em sua

maior parte, não se apresentam, morfológicamente, como cristais isolados. Eles ocorrem entrelaçados como os elos de uma corrente. A dimensão dos silicatos varia, em média, de 1 a 5mm, embora o maior cristal observado foi de 7,7mm. As regiões silicatadas apresentam-se arredondadas, dando a impressão de cêndrulos. De acordo com Curvello et al. (1985), os silicatos correspondem a 50mg/g do meteorito. Plessitas de diversas dimensões e morfologias também po-

dem ser observadas, assim como bandas de Newman. A schreibersita encontra-se adjacente a grãos de silicato, mais precisamente de olivina, adjacente à troilita e, às vezes, englobando cêndrulos de olivina (Figura 6). Já a troilita é observada englobada pelo silicato e, também, em contato com a matriz de kamacita. Eventualmente, ela se decompõe em campos martensíticos. Foram observados três tipos de plessitas: perlítica, esferoidal e net (Figura 7). A taenita, que compõe a

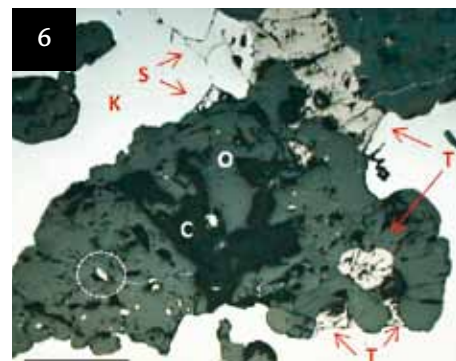


Figure 6

Fotomicrografia, em luz refletida, de seção do meteorito Bocaiúva exibindo schreibersita (S) adjacente a grãos de olivina (O) e a troilita (T) na matriz de kamacita (K). A troilita encontra-se, também, adjacente e inserida na olivina; cavidades na olivina (C); o círculo tracejado branco corresponde à Figura 7. (escala = 200µm).

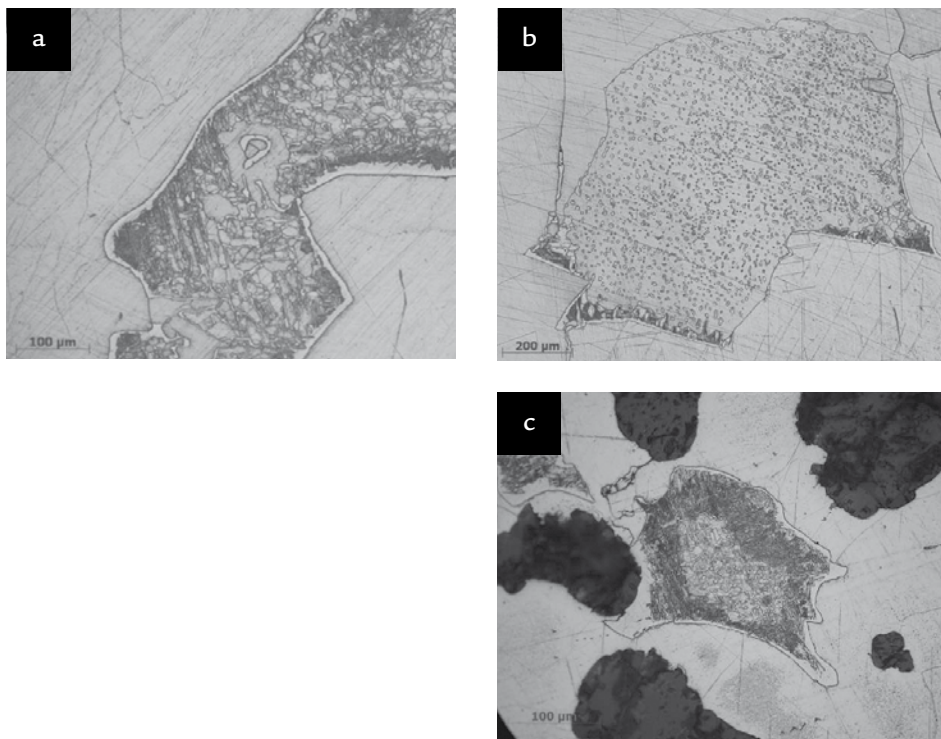


Figure 7

Fotomicrografias, em luz refletida, exibindo os tipos plessíticos em seção do meteorito Bocaiúva. a) plessita net; b) esferoidal; c) net e perlítica.

plessita net, se apresenta com 1 a 10 μ m de espessura isolada na kamacita. Já as do tipo esferoidal consistem em kamacita com 1 a 20 μ m de partículas de taenita esferoidal dispersadas aleatoriamente e ocorrem juntamente com plessitas perlíticas e, às vezes, com a borda decomposta numa estrutura martensítica. As do tipo net possuem crescimento diferenciado de algumas lamelas espessas de kamacita e outras mais finas de taenita, formando, em seu interior, o padrão de Widmanskätten. Em outros casos, a plessita net é encontrada em associação com a do tipo perlítica em suas bordas.

Quando estudado ao microscópio óptico sob luz transmitida, o meteorito Bocaiúva apresenta cristais alongados, arredondados e facetados (Figura 8a) com dimensões que variam de 10 μ m a 1cm (Figura 8b). Nos cõndrulos, são observados cristais de olivina muito fraturados e posicionados em diferentes

orientações. Pelas análises ao MEV/EDS, também observaram-se a diferença de relevo e a composição dos minerais, principalmente com relação aos silicatos e à matriz metálica. Os minerais não opacos identificados por meio de espectros químicos correlacionados à microscopia óptica foram: forsterita, matriz silicatada; pigeonita arredondada no interior de plagioclásios ricos em cálcio e subédrica na olivina; diopsídio; enstatita; apatita euédrica em contato com kamacita e pentlandita, e calcita. Já os minerais opacos são: kamacita; taenita, circundada pela olivina; cromita, sempre aprisionada na olivina; troilita; schreibersita; goethita, nos contornos dos silicatos, proveniente de alteração terrestre; magnetita, com morfologia de veios e aglomerações na olivina, e pentlandita (Figura 9). A variação de Ni foi estudada no interior de um campo plessítico inserido em kamacita e, como era de se esperar, os valores para

a taenita nas bordas da plessita foram maiores que no interior.

Nas regiões silicatadas do Bocaiúva, principalmente em grãos de olivina que não se encontram muito fragmentados, observaram-se a presença de inclusões fluidas primárias, dos tipos monofásicas, bifásicas e até trifásicas (Figura 10) e inclusões secundárias do tipo monofásicas (Figura 11). As inclusões se concentram, geralmente, no centro dos grãos, têm dimensões bastante variadas (10 - 50 μ m) e apresentam grande variação morfológica (arredondada, formato de cristal negativo, prismática e tabular). Nas inclusões do tipo bifásicas e trifásicas, a porcentagem de fluido varia de 50 - 90% da inclusão. As inclusões secundárias são monofásicas de coloração escura, arredondadas e com dimensões que crescem em direção ao centro do cristal, mas, por outro lado, o número de inclusões diminui.

Figure 8
Fotomicrografias, em luz refletida, exibindo os tipos plessíticos em seção do meteorito Bocaiúva.
a) plessita net;
b) esferoidal;
c) net e perlítica.

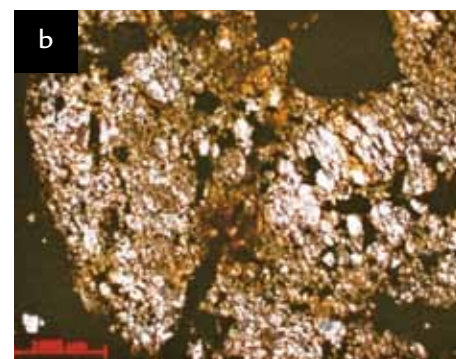
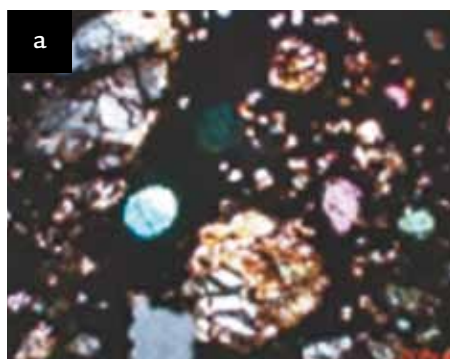


Figure 9
Imagem do meteorito Bocaiúva, obtidas por MEV/EDS.
Pt.3: pentlandita;
pt.4: apatita;
pt.5: kamacita;
pt.6: troilita;
pt.7: pentlandita (escala = 10 μ m).

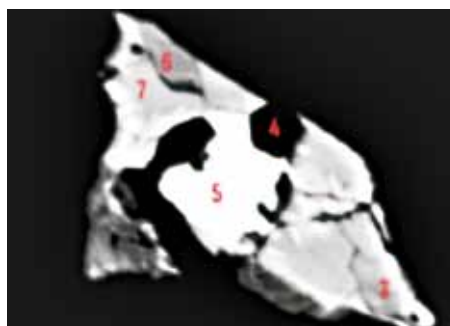


Figure 10
Fotomicrografias do meteorito Bocaiúva, em luz transmitida, exibindo os tipos de inclusões fluidas.
a) A: Inclusão cristalina no formato de cristal negativo;
B: Inclusão fluida trifásica com uma de suas fases sólidas dendríticas,
C: Inclusão cristalina recristalizada;
b) Inclusões fluidas bifásicas e trifásicas.

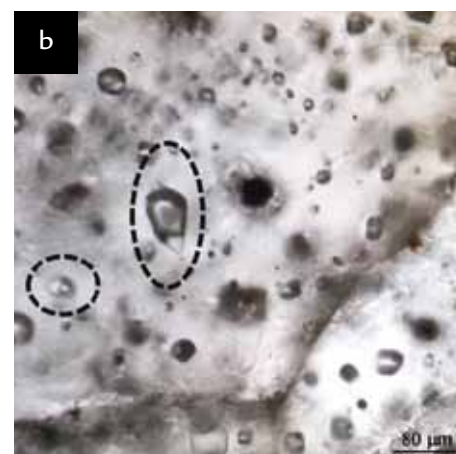
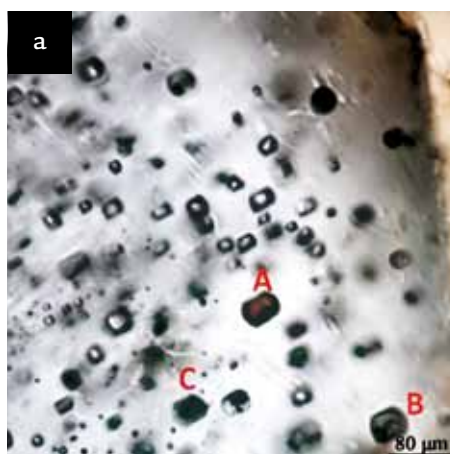


Figure 11
Fotomicrografia do meteorito Bocaiúva, em luz transmitida, de inclusões fluidas e cristalinas.
1: Inclusão fluida primária bifásica,
2: Inclusão cristalina
3: Inclusões fluidas secundárias monofásicas.

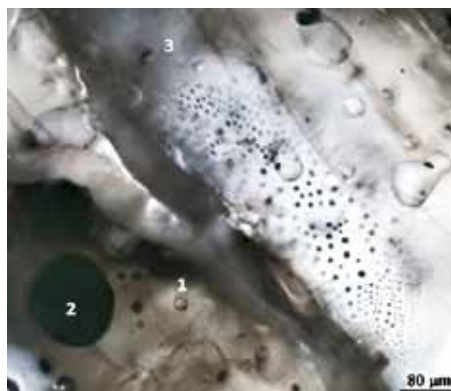
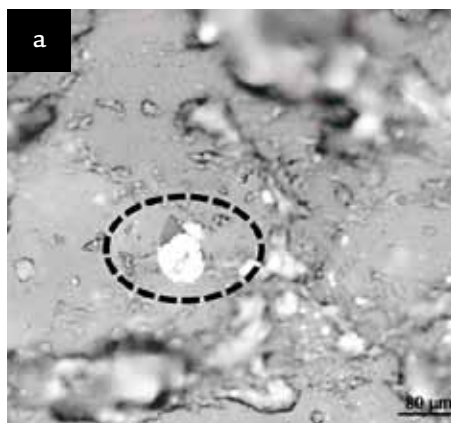


Figure 12
Fotomicrografias do meteorito Bocaiúva, de uma inclusão fundida com duas fases.
a) em luz refletida;
b) em luz transmitida.



As inclusões cristalinas variam de acastanhadas até o preto e com dimensão de 50 a 100 μ m. Quanto à forma, geralmente possuem fases bem definidas e extremidades arredondadas. A presença de duas fases sólidas é muito comum nesse tipo de inclusão, sendo que algumas

aparentam feições de recristalização. Por outro lado, inclusões cristalinas observadas no interior de inclusões fluidas encontram-se como agrupamentos dendríticos. Fraturas parcialmente cicatrizadas com e sem inclusões cristalinas também são observadas.

4. Discussão

De acordo com a classificação da Ciência Meteorítica, a presença do padrão de Widmanstätten enquadra o meteorito João Pinheiro como do tipo siderito, pertencente à classe dos hexaedritos. Por outro lado, o Bocaiúva ainda não possui uma classificação inequívoca entre os pesquisadores da área, embora, estruturalmente, e desconsiderando as suas regiões silicatadas, possa ser classificado como do tipo siderito, pertencente à classe dos octaedritos finos. Porém o mais aceitável é classificá-lo como “metálico silicatado”, ou *ungrouped*, ou seja, que não se enquadra em nenhuma classificação conhecida.

No meteorito João Pinheiro, as regiões que apresentam lamelas de taenita totalmente decompostas com morfologia esferoidal e, às vezes, acicular, numa matriz policristalina, indica que o meteorito passou por processos cósmicos, como, por exemplo, um eventual choque com outro corpo cósmico, provocando

deformação e aumento da pressão e temperatura no meteorito, modificando sua estrutura, fundindo e recristalizando seus minerais. Os campos martensíticos observados ocorrem quando o campo de taenita é superior a 50 μ m de largura e a porção interior com aproximadamente 20 a 25% de Ni. As fraturas da troilita indicam que o mineral é muito mais susceptível ao impacto do que a matriz de kamacita. As fraturas do mineral schreibersita estão relacionadas com a dureza, que varia entre 800 e 950HD, considerada uma dureza relativamente muito alta, mas por outro lado, muito frágil quando submetida a impactos mecânicos. Bandas de Newman são formadas sobre complexas condições de pressão resultantes de ondas de choque de mais de 130kbar (Buchwald, 1975), indicando que o meteorito atingiu essas condições.

No meteorito Bocaiúva, a presença de silicatos dispostos, num aspecto que

As inclusões fundidas são geralmente escuras e compostas por mais de uma fase, tendo morfologia variada (arredondada e alongada) (Figura 12). Fraturas de tensão são comumente observadas nesse tipo de inclusão.

lembram eles de uma corrente, sugere que esses silicatos foram arrastados num fundido metálico de kamacita. Embora o meteorito não apresente totalmente características de condritos, a nomenclatura associada para esse tipo de meteoritos é melhor designada por Norton e Chitwood (2008) como sideritos silicatados. Cristais de olivina fraturados dispostos aleatoriamente nos cêntrulos indicam a presença de fortes impactos cósmicos ao longo da história do meteorito (Norton & Chitwood 2008).

De acordo com a bibliografia pesquisada, a observação de inclusões fluidas e fundidas é a primeira a ser realizada em meteoritos brasileiros. A presença desse tipo de inclusão não é muito comum em meteoritos, desconsiderando os de origem marciana. Uma das primeiras citações foram realizadas por Fièni et al. (1978) em feldspatos e fosfatos de meteoritos condriticos.

5. Conclusão

Um dos fragmentos de meteorito catalogado no Museu MMPDG como “Bocaiúva” não faz parte dos 64kg do meteorito Bocaiúva já conhecido pela ciência e, sim, a de outro, de massa menor, denominado João Pinheiro, não classificado até então. De acordo com estudos petrográficos e metalográficos, a principal diferença do meteorito João Pinheiro, em relação ao Bocaiúva, é a ausência de regiões silicatadas. Além dessa grande diferença, inclusões

crystalinas, fluidas e fundidas foram observadas apenas no Bocaiúva. Esse fato parece não deixar dúvidas quanto à natureza distinta dos dois meteoritos analisados.

O meteorito João Pinheiro é classificado, estruturalmente, como do tipo hexaedrito. Já o meteorito Bocaiúva deve ser classificado como *ungrouped* ou siderito silicatado. Esse tipo de meteorito não provém dos núcleos de asteróides. Diferentes teorias, para ex-

plicar a mistura de silicatos em sideritos, têm sido propostas. Uma delas sugere que um asteróide fragmentou-se devido a um impacto cósmico e reagrupou-se a um corpo parental incompletamente diferenciado. Outra teoria sugere que o impacto gerou partes de metal fundido em asteróides condríticos (Norton & Chitwood 2008). Ainda existem divergências entre os pesquisadores quanto à formação e consequente classificação do Bocaiúva.

6. Agradecimentos

Ao MMPDG e ao Geoquímico Cláudio Vieira Dutra por terem cedido as amostras para estudo. À Universidade

Federal de Ouro Preto e ao Laboratório de Microanálises do DEGEO/EM/UFOP, que permitiram o uso de suas

infraestruturas. À CAPES pelo financiamento da bolsa de mestrado da primeira autora.

7. Referências Bibliográficas

- BUCHWALD, V. F. *Handbook of iron meteorites, their history, distribution, composition, and structure*. Berkeley: University of California Press, 1975. 175p.
- CURVELLO, W. S., MALVIN, D. J., WASSON, J. T., CLAYTON, R. N., MAYEDA, T. K. Bocaiuva – A silicate-inclusion bearing iron meteorite related to the Eagle-Station Pallasites. *Meteoritics*, v. 20, p. 259-273, 1985.
- DESNOYERS, C., MICHEL-LEVY, M. C., AZEVEDO, I. S., SCORZELLI, R. B., DANON, J., GALVÃO, S. E. Mineralogy of the Bocaiuva iron meteorite: A preliminary study. *Meteoritics*, v. 20, p. 113-124, 1985.
- FIÈNI, C., BOUOTE-DENISE, M., PALLAS, P., TOURET, J. Aqueous fluid inclusions in feldspars and phosphates from Peetz chondrite. *Meteoritics*, v. 13, p. 460-461, 1978.
- NORTON, O. R., CHITWOOD, L. A. *Field Guide to meteors and meteorites*. London: Springer, 2008. 287p.

Artigo recebido em 14 de setembro de 2010. Aprovado em 24 de fevereiro de 2011.